

## Analyse du Cycle de Vie de la filière hydrogène énergie – Première étape : définition des objectifs et du champ de l'étude

AISSANI Lynda<sup>ab\*</sup>, ROUSSEAU Patrick<sup>ae</sup>, BOURGOIS Jacques<sup>b</sup>,  
SESSIECQ Philippe<sup>c</sup>, PERIER-CAMBY Laurent<sup>d</sup>, JABOUILLE Florent<sup>ae</sup>

<sup>a</sup>Dpt Gestion des Risques, IRIAF, Université de Poitiers, Centre Du Guesclin, 79000 Niort

<sup>b</sup>ENSM-SE, Centre SITE, 158 cours Fauriel, 42023 St Etienne Cedex 02

<sup>c</sup>Laboratoire Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie, ENSM de Nancy, INPL  
Parc de Saurupt 54042 Nancy Cedex

<sup>d</sup>ENSM-SE, Centre SPIN, Département ProcESS, LPMG UMR 5148, 158 cours Fauriel, 42023 St  
Etienne Cedex 02

<sup>e</sup>LCD, UPR 9028, CNRS, ENSMA, BP 40109, 86961 Chasseneuil

### Résumé

Dans le contexte actuel de pollution atmosphérique et d'épuisement des ressources fossiles, le Groupement des Ecoles des Mines (GEM) a lancé une recherche sur une filière énergétique propre et renouvelable dans le secteur du transport : l'hydrogène produit à partir de biomasse pour utilisation dans une pile à combustible. Le GEM, souhaitant connaître précisément les performances environnementales de cette filière tout le long de son cycle de vie, a commandité la réalisation d'une évaluation environnementale par le biais d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV). Cette ACV compare d'un point de vue environnemental la filière hydrogène à la filière essence et à la filière bioéthanol-hydrogène (éthanol issu de la biomasse lignocellulosique et reformé pour obtenir de l'hydrogène). Les résultats permettront tout d'abord de sélectionner une filière énergétique par rapport à ses performances environnementales et dans un second temps d'améliorer la filière hydrogène développée par le GEM. L'étude porte sur la motorisation d'une voiture citadine et analyse les impacts des trois systèmes rendant un même service : 150 000 km parcourus pendant 15 ans. Le bilan matière et énergie de la filière hydrogène est en cours via la construction d'un arbre des processus.

**Mots-clés :** analyse du cycle de vie, hydrogène énergie, performances environnementales, éco-conception

### 1. Introduction

Ces dernières décennies ont été marquées par une recherche frénétique d'énergies renouvelables et propres. Elle résulte de deux phénomènes environnementaux prépondérants : la prise de conscience du réchauffement climatique engendré par l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre et un épuisement certain des ressources énergétiques du fait de l'augmentation de la consommation d'énergies non renouvelables (combustibles fossiles). Des phénomènes socio-économiques et politiques viennent s'ajouter. En effet, les pays en voie de développement sont en plein essor du fait de leur explosion industrielle et de leur forte démographie. Ils se révèlent de grands consommateurs d'énergie et de grands producteurs de gaz à effet de serre. De plus, l'instabilité politique des pays riches en gisement fait accroître cette prise de conscience. Le secteur d'activité le plus touché par cette dépendance énergétique et le plus impactant sur l'environnement est le secteur du transport.

---

\* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : [lynda.aissani@ext.univ-poitiers.fr](mailto:lynda.aissani@ext.univ-poitiers.fr)

Le Groupement des Ecoles des Mines (GEM) s'est lancé dans cette recherche de nouvelles énergies par le développement de la filière hydrogène énergie pour le secteur du transport. Au sein du GEM, différentes équipes développent des procédés de cette filière.

En effet, l'Ecole des Mines d'Albi est en charge de la production d'un gaz de synthèse par la gazéification de la biomasse à 1500°C dans un réacteur à lit entraîné.

Une équipe de l'Ecole des Mines de Nantes travaille sur la purification de ce gaz pour l'obtention d'hydrogène pur. Ce dernier est ensuite stocké par adsorption sur du charbon actif sous forme tissé ou granulé. Enfin, une équipe de l'Ecole des Mines de Paris à Sophia-Antipolis étudie l'utilisation de l'hydrogène dans une pile à combustible PEMFC (Polymer Exchange Membran Fuel Cell). Ainsi, toutes les étapes du cycle de vie de cette filière sont étudiées par le GEM excepté la production des matières premières telles que la biomasse, la fabrication de la pile et la fabrication et l'étude du moteur électrique.

Dans une démarche d'éco-conception, il est judicieux d'évaluer les performances environnementales de toutes les étapes du cycle de vie d'un système pendant son stade de développement. Dès lors, l'évaluation des performances environnementales de cette nouvelle filière énergétique doit être réalisée. Elle est effectuée au sein du centre SITE (Sciences, Information et Technologies pour l'Environnement) de l'Ecole des Mines de Saint Etienne. L'outil choisi pour cette évaluation est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) afin d'étudier toutes les étapes du cycle de vie. Cette ACV permettra de comparer trois filières énergétiques : la filière hydrogène (développée par le GEM) à la filière essence (référence industrielle actuelle) et à la filière bioéthanol-hydrogène (filiale de transition). Cette étude a deux finalités :

- sélectionner la filière la moins « impactante » sur l'environnement ;
- améliorer la filière hydrogène grâce à l'identification de ses points forts et de ses points faibles du point de vue environnemental.

## **2. L'Analyse du Cycle de vie**

Pour effectuer l'évaluation environnementale de ces systèmes, le GEM a dû choisir l'outil le plus approprié en fonction du contexte et des finalités de l'étude, de la nature et de la complexité des systèmes. Au regard de ces différents critères, il apparaît que l'outil le plus pertinent est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et il s'insère parfaitement dans cette démarche d'éco-conception.

L'ACV est un outil récemment normalisé par l'ISO entre 1997 et 2006 (ISO 14040 à 14044). Il permet d'identifier et de quantifier les aspects et les impacts environnementaux associés tout au long du cycle de vie des systèmes de produit. Ainsi, à chaque étape du cycle de vie, les émissions et les impacts environnementaux associés sont quantifiés. L'existence de transfert de pollution dans l'espace et/ou dans le temps est déterminée et les flux ou les étapes sensibles sont identifiés.

L'ACV est réalisée par un praticien extérieur et sans parti pris. Les résultats de l'ACV sont utilisés dans un processus décisionnel afin d'aider à la prise de décision. Dans l'objectif de communication des résultats au public, une revue critique doit être menée afin de vérifier la conformité de l'étude par rapport à la norme.

L'ACV est une méthode itérative qui se compose des quatre étapes suivantes :

- la définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- l'analyse de l'inventaire et bilan matières et énergies du système de produit ;
- l'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement et modélisation des flux de l'inventaire en impacts environnementaux potentiels ;
- l'interprétation des résultats.

L'analyse du cycle de vie des trois filières énergétiques permet de les comparer du point de vue environnemental et d'identifier les étapes sensibles de chaque filière et plus particulièrement de la filière hydrogène.

### 3. Première étape de l'ACV : définition des objectifs et du champ de l'étude

La définition des objectifs et du champ de l'étude est une étape primordiale lors de la réalisation d'une ACV. Elle permet de fixer les objectifs, de déterminer la nature du système, l'unité fonctionnelle et ses frontières. Cette étape doit être réalisée selon les recommandations de la norme ISO 14041 afin que l'étude soit la plus transparente possible.

#### 3.1 Définition des objectifs

Le GEM a déterminé deux finalités pour l'étude de la filière hydrogène énergie :

- sélectionner une filière énergétique pour l'automobile : détermination de la filière la moins/plus impactante sur l'environnement. Il s'agit de déterminer le positionnement des filières hydrogène (hydrogène direct et bioéthanol-hydrogène) par rapport à la filière essence ;
- améliorer la filière hydrogène énergie développée par le GEM : identification des points faibles (étapes du cycle de vie) de la filière hydrogène énergie vis-à-vis de l'environnement tout le long de son cycle de vie.

Après avoir déterminé les objectifs de l'ACV de la filière hydrogène, le champ de l'étude doit être défini.

#### 3.2 Définition du champ de l'étude

Il s'agit de déterminer la nature du système, l'unité fonctionnelle et les frontières du système.

##### 3.2.1 Fonction du système et unité fonctionnelle

Tout d'abord, la fonction du système est déterminée : motorisation d'une voiture citadine.

Pour cette fonction, trois filières sont étudiées (Figure 1) :

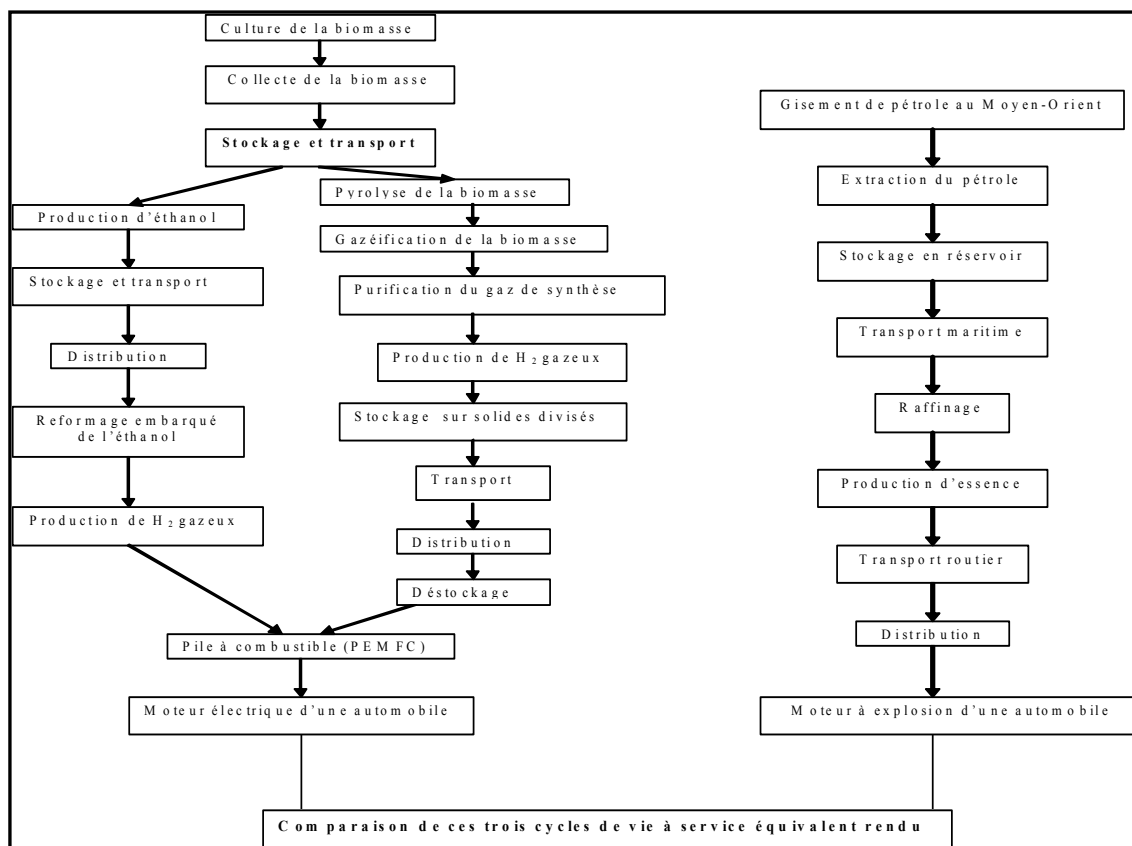


Figure 1. Schéma du cycle de vie des trois filières étudiées

- la filière essence qui est la filière énergétique de référence actuelle ;

- la filière hydrogène direct qui est la filière développée par le GEM ;
- la filière bioéthanol-hydrogène qui est la filière de transition entre les deux précédentes car elle introduit la technologie de la pile à combustible sans le souci de la mise en place des infrastructures du transport d'hydrogène car l'éthanol est un carburant liquide.

Ces trois filières sont comparées pour un service rendu équivalent qui est défini par l'unité fonctionnelle.

L'unité fonctionnelle (UF) est la performance quantifiée du système afin de rendre possible la comparaison des trois filières, en d'autres termes, c'est la quantification du service équivalent rendu. L'unité fonctionnelle est « une référence à laquelle les entrants et les sortants sont liés » (ISO 14040, 1997). Pour cela, elle doit être définie, mesurable, en adéquation avec les finalités de l'étude et faire état des performances actuelles dans le secteur concerné (durée de vie, rendement, autonomie,...). Voici trois unités fonctionnelles possibles pour l'évaluation des systèmes étudiés :

1. quantité de carburant consommée pour parcourir x km pendant y heures ;
2. quantité de carburant consommée pour parcourir 500 km pendant w heures ;
3. quantité de carburant consommée pendant toute la durée de vie du moteur à explosion ou du couple pile à combustible/moteur électrique (nombre de km et nombre d'années).

Le choix de cette unité fonctionnelle s'avère complexe car le paramètre clé est la durée de vie du système dans la mesure où, d'une part, la phase d'utilisation est longue et d'autre part, la filière de référence est l'essence. Dès lors:

- l'UF 1 n'est pas pertinente du fait du choix arbitraire du nombre de kilomètres parcourus, ce kilométrage ne reflète en rien les performances d'un système
- l'UF 2 semble plus pertinente que l'UF 1 puisque ici le choix du kilométrage parcouru n'est pas arbitraire mais fixe, il s'agit de 500 km ce qui correspond environ à l'autonomie d'un réservoir d'une voiture essence
- l'UF 3 est la plus globale des trois UF proposées puisqu'elle permet de prendre en compte les émissions sur toute la durée de vie du système

Au regard de ces trois UF et des finalités de l'étude, l'UF la plus pertinente semble être l'UF 3. Il reste cependant à choisir le système considéré soit le couple pile à combustible/moteur électrique soit le moteur essence sachant qu'il faut prendre en compte les différences de performances des systèmes telles que la durée de vie (la durée de vie du couple pile à combustible/moteur électrique étant inférieure à celle du moteur à combustion). Ainsi, le choix de la durée de vie la plus longue permet de faire état de ces différences de performance et de satisfaire les deux finalités puisqu'il est possible d'étudier la filière hydrogène pour la durée de vie de la pile (avant agrégation des données) ou pour la durée de vie du moteur à explosion (pour des performances équivalentes à la filière essence). Dès lors, la valeur de la durée de vie du moteur à combustion doit être précisée. Elle est déterminée à l'aide du rapport de la direction générale de l'énergie et des matières premières – observatoire de l'énergie édité en mars 2003 et de la note de synthèse du SES par François Jeger éditée en janvier 2001. Elle est de 150000 km parcourus pendant 15 ans.

Pour la filière hydrogène cette UF est de 1500 kg d'hydrogène sachant que pour parcourir 500 km, 5 kg d'hydrogène sont nécessaires (MAZABRAUD, 2004).

### *3.2.2 Frontières du système*

Les frontières du système doivent être déterminées en fonction des objectifs de l'étude. Il s'agit plus précisément d'inclure ou d'exclure certains flux ou processus. Il apparaît important de rappeler que les flux aux frontières du système doivent être élémentaires (non modifiés ou non modifiables par l'homme). La détermination des frontières du système doit être une méthode systématique la plus fiable possible. Ainsi, nous avons choisi la méthode décrite par (l'ISO, 14041) qui tient compte de trois critères : la masse, l'énergie et la pertinence environnementale. Il est important de rappeler que l'ACV est une procédure itérative et ainsi il est toujours possible de revenir à l'étape précédente pour affiner certains choix. De cette façon, lors de la collecte des

données (étape de l'inventaire), il est possible d'affiner les frontières du système selon la disponibilité des données et la pertinence du niveau de détail souhaité pour inclure des flux ou des processus.

Dès à présent, certaines catégories d'étapes peuvent être exclues à condition que les raisons de ces exclusions soient explicitées. Ainsi, sont exclues les étapes suivantes :

- la construction des bâtiments des sites industriels (raffinerie, usine,...) et la fabrication des machines et outils (engins agricoles, réacteur de gazéification, réservoirs de carburant, auxiliaires de la pile, colonne du PSA...). Nous considérons que les impacts sur l'environnement liés à la construction et déconstruction des bâtiments et des équipements sont amortis sur leur durée d'utilisation ;
- la construction du véhicule pour chacune des trois filières dans la mesure où les véhicules sont identiques (en supposant que les différentes motorisations ont un volume et un poids équivalent) sauf en ce qui concerne la pile à combustible, le moteur électrique et le moteur à combustion qui eux seront étudiés ;
- les processus et les flux dont les valeurs sont indisponibles et/ou incalculables du fait du manque de données. Il est donc possible qu'aux frontières du système se trouvent des flux non élémentaires que nous considérerons comme élémentaires.

Afin d'affiner ces frontières du système, nous avons décidé de réaliser un bilan matière et énergie « théorique ». Il a été réalisé, dans un premier temps, pour les procédés développés par le GEM pour la filière hydrogène (Figure 2). Le principe de chaque procédé a été détaillé à la suite de visite dans les laboratoires du GEM concernés et d'une recherche bibliographique. Il s'agit de l'identification des processus et flux élémentaires à modéliser. Ce bilan sera évidemment une base pour le véritable inventaire utilisant les données expérimentales, qui est la deuxième étape de l'ACV.

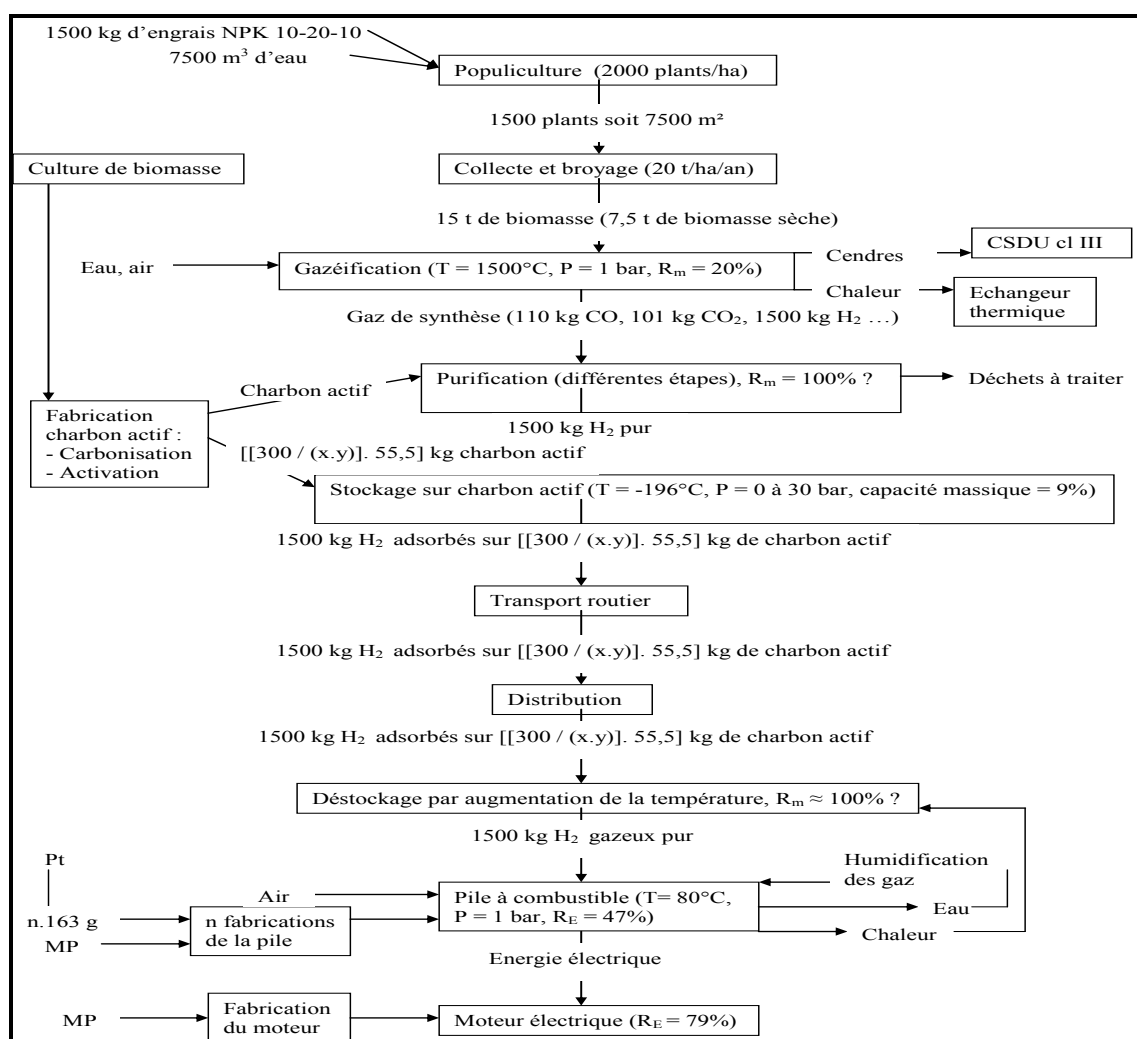
Afin de réaliser ce bilan matière et énergie « théorique », des hypothèses doivent être émises pour combler les manques de données au niveau du cycle de vie complet de la filière hydrogène puisque le GEM n'aborde pas toutes les étapes du cycle de vie. Ces données manquantes essentielles sont :

- le choix de la biomasse pour la production d'hydrogène et de charbon actif ;
- le rendement des différentes étapes de purification ;
- le nombre de cycle d'adsorption possible du charbon actif avant la régénération ou la fin de vie ;
- le mode opératoire de cette régénération ;
- le rendement du déstockage du charbon actif ;
- la durée de vie de la pile ;
- la fabrication de la pile ;
- la fabrication du moteur électrique.

Ces manques ont déjà été, pour la plupart, résolus par une étude bibliographique à l'exception de certains processus comme la fabrication de la pile et du moteur électrique.

En ce qui concerne la biomasse, le choix du type d'essence de bois dépend évidemment de différents facteurs tels que le rendement de la gazéification, la rapidité de la pousse, le besoin en eau et la disponibilité des données. Afin de satisfaire tous ces critères, la biomasse choisie est une plantation à courte voire très courte rotation (coupe à 6 ou 8 ans voire à 2 ou 4 ans) qui pousse en climat tempéré et avec un besoin en eau modéré. Au niveau du rendement de gazéification, le type d'essence de bois ne semble pas jouer un rôle très important. Cela reste tout de même à vérifier. Au regard de ces résultats, la biomasse choisie est le peuplier.

En ce qui concerne les rendements de la purification du gaz de synthèse et du déstockage, ils sont considérés, pour l'instant équivalents à 100% dans l'attente de données plus précises au niveau du mode opératoire et des bilans matière et énergie.



*Flèche : flux de matière*

*MP : matières premières*

*Pt* : platine

$n$  : nombre de piles nécessaires

$x$  : nombre d'utilisations possibles

$y$  : nombre de régénérations possibles

$P$  : pression

$T$  : température

*RE* : rendement énergétique

*Rm* : rendement matière

*CSDU cl III : centre de stockage de classe 3*

Figure 2. Arbre des processus de la filière hydrogène énergie pour la durée de vie d'un véhicule

Le principal verrou de cette filière est le stockage de l'hydrogène sur du charbon actif. En effet, outre les problèmes techniques de mise en place dans un véhicule dus à une mauvaise capacité volumique et à la très basse température de stockage (77 K), la technologie du charbon actif n'est pas encore bien maîtrisée. En effet, le nombre de cycle d'adsorption possible du charbon actif avant régénération n'est pas connu pour l'instant. Cependant, la quantité de charbon actif pour stocker 5 kg d'hydrogène a été déterminée en sachant que sa capacité massique de stockage est



de 9%. Cette quantité est de 55,5 kg. Pour parcourir 150 000 km, la quantité d'hydrogène à stocker est de 1500 kg et la quantité de charbon nécessaire est donc de :  $[(300 / (x/y)) \cdot 55,5]$  kg avec x le nombre d'utilisations possibles et y le nombre de régénérations possibles.

Enfin un autre verrou de cette filière énergétique est la durée de vie de la pile à combustible. Du fait du peu de recul sur cette technologie, sa durée de vie est difficilement estimable. Il existe certaines estimations (Baurens et Poirot-Crouvezier, 2004) qui l'évaluent à quelques centaines d'heures alors que le moteur à combustion fonctionne entre 3000 et 5000 heures selon la vitesse moyenne. Dès lors, il nous est impossible, pour l'instant, de quantifier le nombre de piles nécessaires pour parcourir 150 000 km en 15 ans.

La Figure 2 présente l'avancement du bilan matière et énergie « théorique » de la filière hydrogène énergie en l'état actuel de nos connaissances.

Lorsque ce bilan « théorique » sera terminé, la méthode de détermination des frontières (ISO 14041, 1998) sera utilisée et chaque flux sera examiné au regard des trois critères masse, énergie et pertinence environnementale pour son inclusion ou exclusion du système.

### 3.2.3 Le dimensionnement du système

Il nous est apparu important de dimensionner le système afin de :

- situer les installations et les bassins de production associés ;
- connaître les capacités de production ;
- évaluer les flux qui transitent.

Dans un premier temps, l'importance du parc automobile équipé de pile à combustible doit être évalué pour le référentiel géographique choisi, la France métropolitaine. Etant donné le contexte de notre étude, le parc automobile « hydrogène » doit être équivalent au parc « essence ». D'après les données de (l'Observatoire de l'Energie, 2003), le parc automobile « essence » s'élève à 18 000 000 de véhicules. De ce fait, nous considérons un parc automobile « hydrogène » composé également de 18 000 000 de véhicules.

Dans un second temps, il convient de quantifier les besoins en hydrogène afin d'évaluer le nombre d'installations nécessaires et leur capacité de production. Tout d'abord, la quantité d'hydrogène nécessaire pour alimenter ce parc automobile pendant 15 ans pour parcourir 150 000 km. Cette quantité est de  $18 \cdot 10^8$  kg d'hydrogène/ an. Dès lors la quantité de biomasse sèche nécessaire par an est de  $9 \cdot 10^6$  t.

D'autre part, la taille minimale d'une installation de gazéification avec un réacteur à lit entraîné est de 50 MWth avec l'introduction de 10 t de biomasse sèche. Le taux d'utilisation d'une telle installation est de 8000 h/an soit 22 h/jour.

Le nombre d'installations nécessaires est de l'ordre d'une centaine en d'autres termes une par département français métropolitain. Cependant, ce nombre est une estimation grossière pour évaluer la faisabilité de la filière hydrogène énergie. Pour l'affiner, il convient de réfléchir aux critères à prendre en compte pour situer les installations tels que :

- le nombre d'habitants par département ;
- le nombre de véhicules « essence » par habitant ;
- la surface cultivable disponible par département ou région pour évaluer les capacités de production de peuplier par département. Ces données peuvent être recherchées au niveau de la chambre d'agriculture et des eaux et forêts ;
- les gisements de biomasse disponible par département ;
- la possibilité et la distance de transport de biomasse ou d'hydrogène.

Dans un premier temps, il nous a semblé plus pertinent de placer les installations de gazéification à proximité des lieux de consommation. Mais au regard de la facilité de transport d'hydrogène par pipeline et de la faible quantité de surface cultivable pour certains départements, une question se pose en ce qui concerne cette localisation : faut-il privilégier plutôt la proximité des bassins de production (gisement et culture de biomasse) ou plutôt la proximité des bassins de consommations ? Dès lors, une réflexion doit être menée sur la localisation des gisements de biomasse et des surfaces cultivables disponibles.

Ce dimensionnement permet de juger grossièrement la faisabilité de la mise en place de la filière hydrogène énergie en situant les installations par rapport aux besoins de production, en évaluant les bassins de productions associés aux installations et les flux qui transitent. Au regard de ces premiers résultats, la mise en place de la filière hydrogène en France semble réalisable mais il reste à évaluer le gisement de biomasse disponible et les surfaces cultivables.

#### **4. Conclusion**

Dans un contexte de crise environnementale, la recherche de nouvelles énergies propres et renouvelables est devenue une nécessité. Le GEM a pris conscience de cette urgence et s'est engagé dans cette recherche en développant une filière énergétique prometteuse dans le domaine du transport, la filière hydrogène via la technologie de la pile à combustible. Cependant, cette filière a encore tout à prouver au niveau environnemental. Ainsi, le GEM a décidé de réaliser, dans sa démarche d'éco-conception, l'évaluation environnementale de cette filière en développement. L'outil choisi pour cette évaluation est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Cette ACV analyse les impacts environnementaux de trois filières énergétiques : la filière essence, la filière hydrogène direct et la filière bio-éthanol. Grâce aux résultats de l'ACV, le GEM désire, dans un premier temps, sélectionner la filière la moins impactante et, dans un deuxième temps, améliorer la filière hydrogène du point de vue environnemental. Dès lors, la première étape de l'ACV a été réalisée avec la définition de la fonction du système « motorisation d'une voiture citadine ». La performance quantifiée du système, appelée unité fonctionnelle a été déterminée. Parmi trois propositions, nous avons choisi comme unité fonctionnelle : la quantité de carburant consommée pour parcourir 150 000 km pendant 15 ans (durée de vie d'un moteur essence). Pour déterminer finement les frontières du système de la filière hydrogène, un bilan matière et énergie « théorique » a été entamé ainsi que la construction de l'arbre des processus associé. Ce bilan permet d'inclure ou d'exclure certaines étapes et/ou certains flux selon la méthode de l'ISO 14041 et servira de base pour l'inventaire (deuxième étape de l'ACV). Finalement, nous avons entrepris de dimensionner le système afin de rendre compte de la faisabilité technologique d'une telle filière. Cette première étape est indispensable à la bonne réalisation de l'ACV mais déjà certaines difficultés ont été rencontrées lors de la réalisation de ce bilan « théorique » pour la récolte des données et le dimensionnement de cette filière qui n'est qu'au stade de développement.

Les étapes d'inventaire et d'évaluation des impacts suivront. Enfin il semble nécessaire d'aborder la dangerosité de l'utilisation d'un véhicule à hydrogène. Ainsi, une évaluation des risques liés à l'utilisation des véhicules des trois filières sera réalisée.

#### **Références**

- ISO 14040, 1997. Management environnemental. Analyse de cycle de vie, principes et cadre
- ISO 14041, 1998. Management environnemental. Analyse de cycle de vie, définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire
- ISO 14042, 2000. Management environnemental. Analyse de cycle de vie, évaluation de l'impact de cycle de vie
- ISO 14043, 2000. Management environnemental. Analyse de cycle de vie, Interprétation du cycle de vie
- ISO 14044, 2006. Management environnemental. Analyse de cycle de vie, Exigences et lignes directrices
- Baurens, P., Poirot-Crouvezier, J.P., 2004. La conception de systèmes à pile à combustible : application à l'automobile. CEA : l'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie 50-51.
- Mazabraud, P., 2004. Le stockage embarqué de l'hydrogène. CEA : l'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie 50-51.
- Observatoire de l'Energie, 2003. direction générale de l'énergie et des matières premières, ministère de l'économie et des finances. Consommation de carburants des voitures particulières en France 1990-2001.

#### **Remerciements**

Je remercie du temps accordé lors de mes visites :

Christian Beauger et Patrick Achard de l'Ecole des Mines de Paris, Centre Énergétique et Procédés BP 207, 06904 Sophia Antipolis Cedex



*Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 96 – 2007*  
*ISBN 2-910239-70-5, Ed. SFGP, Paris, France*

Pascaline Pré et Hervé Dumont de l'Ecole des Mines de Nantes B.P. 20722 44307 NANTES  
Cedex 03

Sylvain Salvador, Carole Couhert et Jean-Michel Commendré de l'Ecole des Mines d'Albi  
Carmaux

Campus Jarlard - 81013 Albi CT Cedex 09